中国科学: 技术科学 2025 年 第 55 卷 第 9 期: 1467 ~ 1479
SCIENTIA SINICA Technologica techcn.scichina.com
《中国科学》杂志社 SCIENCE CHINA PRESS
论 文 无人飞行器导航、制导与控制专题

全驱型空中接触式作业机器人系统设计与实现

梁嘉诚[1,2], 王耀南[1,2*], 钟杭[1,2*], 张智星[1], 张辉[1,2]

1. 湖南大学人工智能与机器人学院, 长沙 410082
2. 湖南大学机器人视觉感知与控制技术国家工程研究中心, 长沙 410082
* E-mail: yaonan@hnu.edu.cn; zhonghang@hnu.edu.cn

收稿日期: 2025-04-15; 接受日期: 2025-07-15; 网络版发表日期: 2025-09-08
国家重点研发计划(编号: 2022YFB4701800)、国家自然科学基金项目(批准号: 62133005)、江西省自然科学基金项目(编号: 20232BAB212023)、广东省基础与应用基础研究基金项目(编号: 2024A1515240062)和湖南省研究生科研创新项目(编号: CX20240033)资助

摘要 面向大型桥梁、风力发电叶片和油气管道等国家重大工程基础设施对空中机器人技术与装备的重大需求, 开展具备空中接触式作业能力的机器人技术与系统研究. 首先, 设计与研制全驱型空中接触式作业机器人系统, 全驱特性能够独立控制空中飞行平台的六维位姿, 且机器人末端集成主动轮行走装置以满足连续滑动检测需求. 其次, 建立空中机器人与环境耦合作业模态下的动力学模型, 并引入基于广义动量的外部转矩估计器观测外部扰动. 然后, 针对持续稳定的交互检测作业难题, 提出一种简单且有效的阻抗柔顺控制框架. 为测试和验证所设计的系统及其相关算法, 搭建高保真仿真平台, 开展系列抗扰与交互仿真测试. 最后, 进行实际风力发电叶片连续滑动检测实验, 验证所设计的全驱型空中接触式作业机器人系统的可靠性.

关键词 全驱型空中接触式作业机器人, 设计与集成, 建模与控制, 高保真仿真平台, 实验测试与验证

1 引言

能源和交通等国家重大工程基础设施是国家经济命脉, 我国已建成全球最大电力系统, 桥梁隧道规模居世界前列, 如何保障其安全高效地运行维护至关重要. 结构损伤作为一类隐蔽性强、危害性大和需近距离接触式检测的病害, 是运行维护的重点与难点, 如大型桥梁结构病害检测、风力发电叶片结构维护和油气管道结构探伤等[1]. 此类病害发生在高空和空间受限等极端环境, 传统维护手段与装备效率低、难度大、危险性高, 大都采用停机方式, 经济社会效益差. 因此, 亟需研究空中特种作业机器人技术与装备, 替代人工实现工程基础设施的安全高效运行维护[2].

空中机器人作为一类典型的移动机器人, 早期研究热点多以在复杂环境中如何安全避免与环境碰撞为目标, 以被动观测(如电力巡检[3]和灾情勘察[4]等)或与环境弱交互(如空中运输[5]、空中加油[6]和环境采样[7]等)形式工作, 极大限制了其应用场景. 而具备类生物主动作业能力的高适应空中机器人近来被深入研究, 是当前学术领域的研究前沿, 也是空中机器人未来发展方向, 可广泛应用于基础设施运维检测和军事特种排爆作业等领域. 具备主动作业能力的空中接触式机

引用格式: 梁嘉诚, 王耀南, 钟杭, 等. 全驱型空中接触式作业机器人系统设计与实现. 中国科学: 技术科学, 2025, 55: 1467–1479
Liang J C, Wang Y N, Zhong H, et al. Design and implementation of a fully-actuated aerial contact manipulation robot system (in Chinese). Sci Sin Tech, 2025, 55: 1467–1479, doi: 10.1360/SST-2025-0077

© 2025 《中国科学》杂志社 www.scichina.com

器人通常是在空中飞行平台基础上增加主动作业机构以对环境施加影响的机器人系统，其同时具备飞行运动平台大范围机动与作业机构高灵巧操作特性[8~10].

对于空中飞行平台而言，传统欠驱动无人机的螺旋桨轴向指向同一方向，会经历耦合的位姿运动. 这导致在使用此类欠驱动无人机作为飞行平台时，其建模和控制非常复杂[11]. 近来，全驱型无人机因其卓越的六维位姿独立控制特性，在各种应用场景中取得了显著的成功. 全驱型特性能够独立控制空中飞行平台的位置和姿态, 并增强控制鲁棒性和灵活性. 通常, 全驱动无人机可分为两种类型: 螺旋桨固定倾斜[12,13]和螺旋桨可变倾斜[14,15]配置. 固定倾斜配置的特点是螺旋桨以固定角度指向不同方向，使其更容易实现并允许独立的位姿控制. 然而, 由于驱动力的对立, 固定倾斜配置会发生能量损失. 相比之下, 螺旋桨固定在可移动单元上的可变倾斜配置可以实现全向飞行. 然而, 可变倾斜配置的设计和控制通常更为复杂，并且由于可移动单元由不精确的伺服器驱动，这种配置往往表现出较慢的动态效应. 考虑到功能和实施成本之间的权衡，螺旋桨固定倾斜配置是这项工作中被选为促进空中操纵的飞行平台的有利选择.

面向持续接触式检测任务需求，近期刚性杆或多自由度机械臂已被安装在飞行平台上用于完成平面和结构化曲面下空中点接触[16,17]和滑动接触[18]等作业, 但面向非结构化复杂曲面连续接触检测尚存在空白, 亟需设计研制新型空中作业机器人系统结构完成此类作业任务. 在算法层面上，力/位混合控制[19,20]和阻抗控制[10~13]策略被广泛用于控制空中交互过程中的位置和相互作用力，同时保持整个系统的稳定性. 力/位混合控制方法能够直接精确地控制接触方向上的交互转矩，其核心思想是分别在无约束空间和约束空间中实现位姿控制和转矩控制[19,20]. 然而，需选择一个先验矩阵来确定位姿控制和转矩控制的维度. 此外，为确保空中交互作业任务的稳定性和安全性，需仔细考虑鲁棒性和控制律切换问题. 因此，力/位混合控制方法通常适用于已知且平滑的环境. 阻抗控制则允许空中作业机器人在统一框架内沿受约束和不受约束的方向移动，其核心思想是建立末端执行器位移与交互转矩之间的动态关系，该方法通常较少执行离线任务规划，并且对扰动和不确定性具有足够的鲁棒性. 此外, 阻抗控制在接触和分离过渡之间提供了更高的稳定性和安全性，且易于实现. Liang等人[17]提出了一种变阻抗控制方案, 用于空中稳定接触操作. Markovic等人[21]和Xu等人[22]提出了基于刚度估计的自适应阻抗控制方法，用于连续点接触[21,22]和滑动接触操作[22]. Bodie等人[14]采用飞行时间相机在线改变可变倾斜六旋翼飞行器所需的虚拟惯性、阻尼和刚度系数，以实现点接触和滑动接触操作. 然而，上述方法仅面向结构化表面接触作业，可能不适应非结构化曲面接触检测任务.

本文面向重大工程基础设施高空检测运维需求, 旨在设计并研制全驱型空中接触式作业机器人(fully actuated aerial contact manipulation robot, FAACMR)系统, 主要贡献包括: (1) 设计研制出一种新型FAACMR系统，包括旋转作业机械臂和末端连续滑动检测装置, 可实现末端任意方向接触检测作业; (2) 提出一种用于FAACMR系统的简单且有效的导纳柔顺控制框架，解决持续稳定交互难题; (3) 搭建高保真仿真平台，并进行系列仿真测试验证所设计系统的可行性，进而实际实验验证所研制系统的可靠性. 综上所述，研究具备主动作业能力的空中机器人技术对补充和完善移动作业机器人系统理论具有重要的科学意义.

本文组织结构安排如下: 第2节描述系统设计与集成; 第3节建立机器人动力学模型，并使用阻抗柔顺控制器控制, 柔顺性由控制器和弹簧结构共同提供, 接触目标点由深度相机离线测量获得; 第4节搭建高保真仿真平台，并进行仿真测试; 第5节进行真实场景下的实验测试验证, 结果表明所研制系统的可靠性.

2 系统设计与集成

2.1 系统整体设计

为研制FAACMR系统样机，整体优化设计是一个重要的前提工作. 为此, 在SolidWorks软件中设计全驱型无人机、高适应轻量化旋转作业机械臂和末端滑动检测装置的机械结构, 如图1所示.

对于全驱型无人机，传统的欠驱动无人机由于螺旋桨轴向指向同一方向，导致耦合的位姿运动. 采用此类欠驱动无人机作为飞行基座时，其建模和控制比较复杂. 为此，将螺旋桨以固定角度指向不同方向并安装在无人机机臂上，这种配置能解耦六维位姿，实现独立的位置和姿态控制. 机载处理模块在上层计算

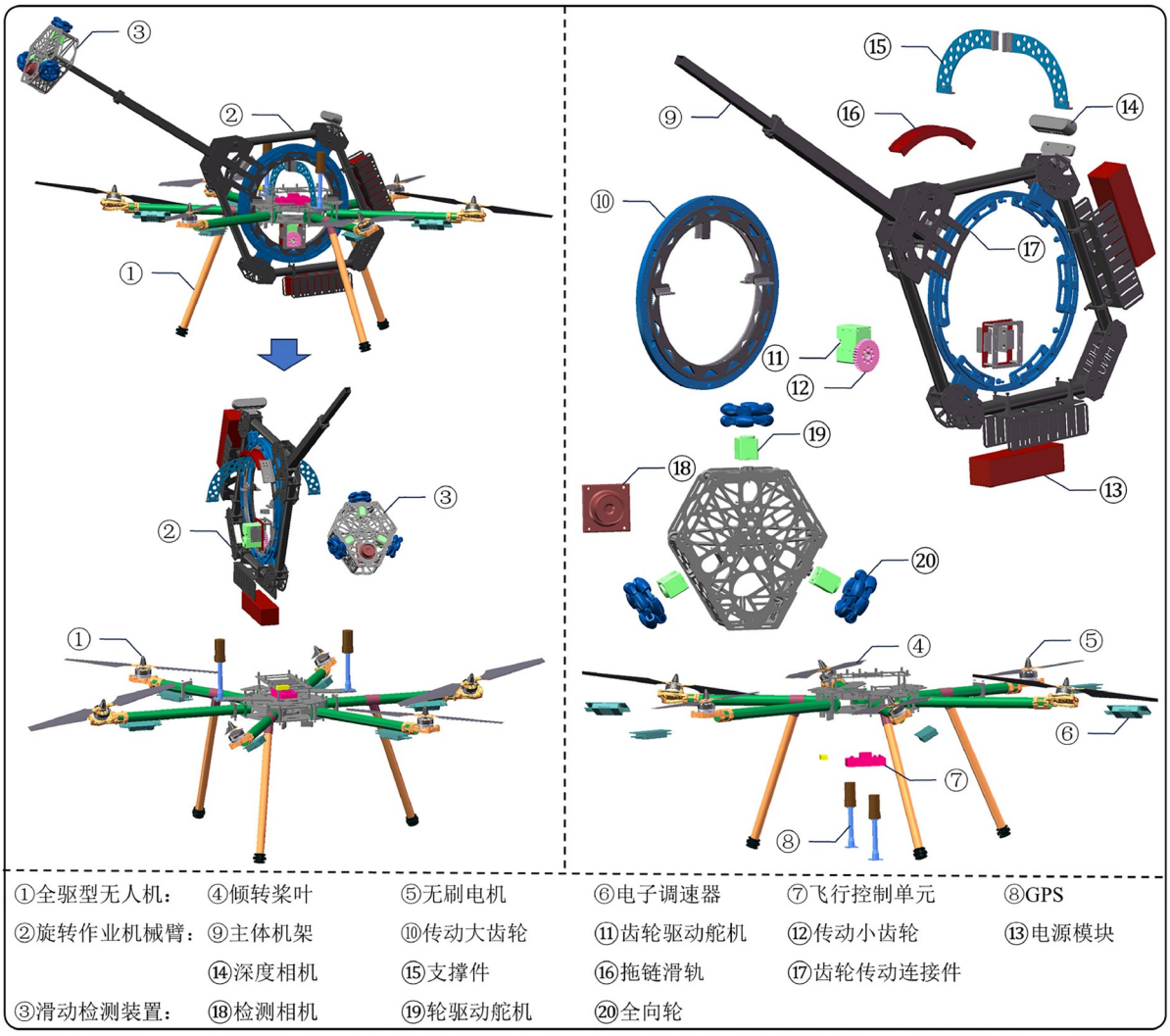


图 1　(网络版彩图)FAACMR系统整体设计

Figure 1　(Color online) Overall design of the FAACMR system.

处理实时驱动控制信号, 传输至低层级飞行控制单元, 进而通过电子调试器(electronic speed control, ESC)驱动动力单元(无刷电机与螺旋桨), 从而控制FAACMR进行空中接触式作业.

旋转作业机械臂由主体机架、齿轮传动机构、电源模块、深度相机、支撑件和拖链滑轨组成. 主体机架用于搭载末端滑动检测装置, 并通过齿轮传动机构与飞行平台刚性连接. 作业机械臂的主体机架前端安装末端滑动检测装置、中间连接件和高集成的传感器, 后端设计两个电源模块安装板, 将机器人的两个电源模块安装在作业机械臂的另一端, 并作为配重以平衡末端滑动检测装置重量产生的扭矩, 使得作业机械臂的重心始终保持在机体中心, 从而缓和作业机械臂旋转运动引发的重心偏移问题. 深度相机用于获取末端滑动装置检测作业过程中的第一视角. 为实现对目标曲面进行任意角度的主动接触检测, 旋转作业机械臂与飞行平台之间设计成齿轮传动机构, 可实现末端装置进行360°全向探测作业. 齿轮传动连接件同时连接主体机架和传动大齿轮, 使齿轮传动装置安装在作业机构上, 传动大齿轮内部嵌有360°的齿轮滑槽, 滑槽与齿轮驱动舵机的传动小齿轮连接, 从而实现作业机构进行任意角度的旋转; 舵机连接件使驱动舵机刚

性安装在飞行平台上.

为实现末端连续滑动检测作业，末端检测装置设计成了主动全向轮滑动构型. 末端滑动检测装置包括检测相机、万向轮和驱动舵机. 此外，装置末端还能模块化集成超声波传感器和钢筋检测仪等传感器，可以应对不同的任务需求，实现对油气管道和桥梁设施的表面结构损伤进行连续精准检测.

2.2 系统研制与传感器集成

根据设计的三维模型，研制出实际的FAACMR系统，包括全驱型六旋翼无人机、旋转作业机械臂和末端滑动检测装置，如图2所示，其总重量约为8.745 kg. FAACMR硬件系统架构如图3所示，全驱型无人机由传统六旋翼飞行器发展而来，旋翼对称间距为1200 mm, 螺旋桨以固定角度α (α=30°)倾斜, 并指向不同方向. 无人机基座上安装有Intel NUC-i7机载电脑, 用于处理高层级任务控制信号，并通过微型飞行器连接(micro air vehicle link, MAVLink)通信协议将控制信号发送至Pixhawk V5+飞行控制器, 用于处理低层级飞行控制. 飞行控制器产生的旋翼转速指令信号被传输至型号为EOLO 50A的ESC，并发送PWM信号以驱动EOLO V5210无刷电机，从而控制EOLO CN17*6.2寸螺旋桨旋转.

旋转作业机械臂由Dynamixel XH540-W270-R伺服舵机通过齿轮传动驱动，可相对于浮动基座在x-z平面内实现圆周运动, 其内部嵌有360°齿轮溜槽, 溜槽与齿轮驱动舵机上的传动小齿轮相连. 旋转作业机械臂运动范围为0°~180°, 传动比约为1:5. 滑动检测装置距旋转作业机械臂几何中心约为970 mm, 为避免作业臂驱动舵机受载失速, 末端最大负载重量约为2 kg. 为缓解旋转作业机械臂在横向方向上的抖动，设计两个支撑板，将机械臂底座与飞行平台基座连接起来. 此外，在旋转作业机械臂上还安装拖链滑轨，用于布置机械臂和末端滑动检测装置等电子元件的走线.

末端滑动检测装置与旋转作业机械臂之间使用弹簧联轴器连接, 利用弹性带辅助归位, 能有效缓和强接触的耦合特性. 滑动检测装置尺寸为656 mm×200 mm×200 mm，带杆约重540 g，其三个万向轮安装在检测装置上，并分别由三个Dynamixel XC330-T288-T舵机驱动, 能实现末端主动连续滑动, 同时微型检测相机集成在末端碳纤维板上，保障滑动过程中检测细微裂纹,



图 2 (网络版彩图)研制的FAACMR

Figure 2 (Color online) Designed FAACMR.

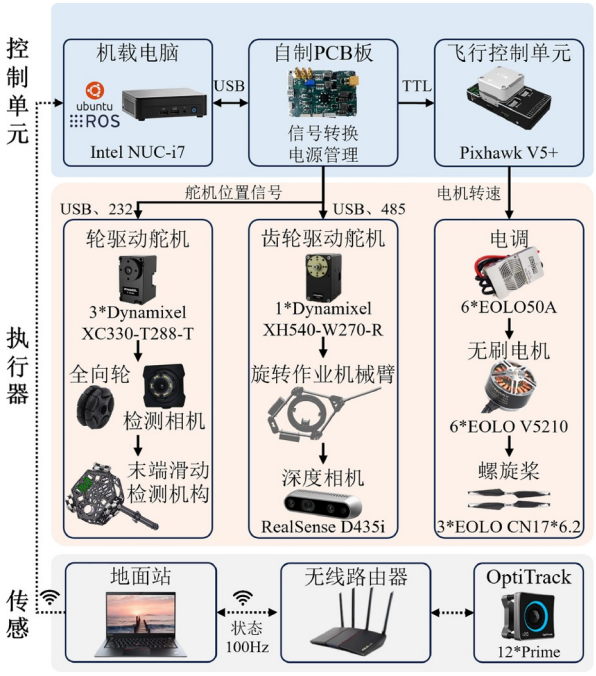


图 3 (网络版彩图)FAACMR系统硬件框架

Figure 3 (Color online) Hardware framework of the FAACMR system.

检测相机量程为0~10 mm, 检测精度为0.01 mm.

秉承轻量化设计理念，旋转作业机械臂和末端滑动检测装置由碳纤维材料和铝合金组装而成，传动部件由塑料材料3D打印制成. 特别地，设计和制造一块印刷电路板(printed circuit board, PCB)来管理电源和处理信号转换. 图3中的控制单元描述了PCB板与其他控制器或伺服器的详细信号转换，包括机载电脑和伺

服舵机在内相应的电压也由自制的PCB板转换和提供.

3　系统建模与控制

3.1　动力学建模

根据设计研制的FAACMR系统, 建立其动力学模型, 然后为仿真和实验中使用的FAACMR系统提供模型基础. 如图4所示, 考虑如下坐标系:

(1) 惯性坐标系$\mathcal{F}_I$: $\{O_I$ - $x_I, y_I, z_I\}$, z_I指向竖直方向;

(2) 无人机机体坐标系$\mathcal{F}_B$: $\{O_B$ - $x_B, y_B, z_B\}$, 其中原点O_B与FAACMR重心位置重合;

(3) 机械臂关节坐标系$\mathcal{F}_M$: $\{O_M$ - $x_M, y_M, z_M\}$, 其中原点O_M与旋转几何中心位置重合;

(4) 末端工具坐标系$\mathcal{F}_E$: $\{O_E$ - $x_E, y_E, z_E\}$, 其中接触交互点发生在原点O_E上;

(5) 与第i个旋翼转子相关的坐标系$\mathcal{F}_{Ri}$: $\{O_{Ri}$ - x_{Ri}, y_{Ri}, $z_{Ri}\}$, 其中z_{Ri}表示产生推力的方向.

定义$\mathbf{p}_I\in\mathbb{R}^3$和$\mathbf{v}_I\in\mathbb{R}^3$分别为惯性坐标系$\mathcal{F}_I$下无人机平台重心位置和线速度; $\mathbf{p}_B\in\mathbb{R}^3$和$\mathbf{v}_B\in\mathbb{R}^3$分别为机体坐标系$\mathcal{F}_B$下无人机平台重心位置和线速度; $\mathbf{R}_B\in SO(3)$表示从机体坐标系$\mathcal{F}_B$到惯性坐标系$\mathcal{F}_I$的旋转矩阵, 其中$SO(3)=\{\mathbf{A}\mid \mathbf{A}\mathbf{A}^{\mathrm{T}}=\mathbf{I}\cap\|\mathbf{A}\|=1\}$; $\boldsymbol{\omega}_B\in\mathbb{R}^3$为机体坐标系$\mathcal{F}_B$下无人机平台的角速度.

因此, 全驱型无人机平台的平移和方位运动学可表示如下:

$$\dot{\mathbf{p}}_I=\mathbf{v}_I=\mathbf{R}_B\mathbf{v}_B, \tag{1}$$

$$\dot{\mathbf{R}}_B=\mathbf{R}_B[\boldsymbol{\omega}_B]_\times, \tag{2}$$

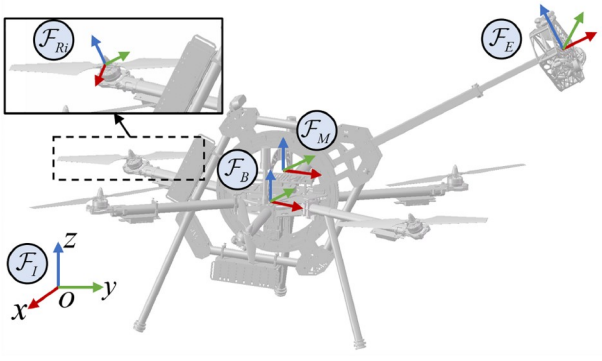


图 4　(网络版彩图)FAACMR系统的坐标定义

Figure 4　(Color online) Coordinate definition of the FAACMR system.

式中, $[\cdot]_\times\in SO(3)$表示与向量$\cdot\in\mathbb{R}^3$相关的斜对称矩阵. 接着, 利用牛顿-欧拉方法, 建立机体坐标系$\mathcal{F}_B$下FAACMR系统的动力学模型如下[14]:

$$\underbrace{\begin{bmatrix} m\mathbf{I}_3 & 0\\ 0 & \mathbf{J}\end{bmatrix}}_{\mathbf{M}}\underbrace{\begin{bmatrix}\dot{\mathbf{v}}_B\\ \dot{\boldsymbol{\omega}}_B\end{bmatrix}}_{\dot{\mathbf{q}}_B}+\underbrace{\begin{bmatrix} m[\boldsymbol{\omega}_B]_\times & 0\\ 0 & -[\mathbf{J}\boldsymbol{\omega}_B]_\times\end{bmatrix}}_{\mathbf{C}}\underbrace{\begin{bmatrix}\mathbf{v}_B\\ \boldsymbol{\omega}_B\end{bmatrix}}_{\mathbf{q}_B}+\underbrace{\begin{bmatrix} mg\mathbf{R}_B^{\mathrm{T}}\mathbf{e}_3\\ 0\end{bmatrix}}_{\mathbf{G}}=\mathbf{W}_c+\mathbf{W}_e, \tag{3}$$

式中, $m\in\mathbb{R}$为FAACMR系统的总重量, $\mathbf{J}\in\mathbb{R}^{3\times3}$为惯性张量, $g\in\mathbb{R}$为重力常数, $\mathbf{e}_3=[0,\ 0,\ 1]^{\mathrm{T}}$; $\mathbf{W}_c\in\mathbb{R}^6$表示FAACMR的输入转矩(力和力矩), $\mathbf{W}_e=[\mathbf{f}_e^{\mathrm{T}},\ \boldsymbol{\tau}_e^{\mathrm{T}}]^{\mathrm{T}}\in\mathbb{R}^6$表示作用在FAACMR系统上的额外转矩. 定义$\mathbf{q}_B=[\mathbf{v}_B^{\mathrm{T}},\ \boldsymbol{\omega}_B^{\mathrm{T}}]^{\mathrm{T}}\in\mathbb{R}^6$, $\mathbf{M}=\mathrm{diag}(m\mathbf{I}_3,\ \mathbf{J})\in\mathbb{R}^{6\times6}$为正定对角惯性矩阵, $\mathbf{C}=\mathrm{diag}(m[\boldsymbol{\omega}_B]_\times,\ -[\mathbf{J}\boldsymbol{\omega}_B]_\times)\in\mathbb{R}^{6\times6}$表示离心和科氏项, $\mathbf{G}=[(mg\mathbf{R}_B^{\mathrm{T}}\mathbf{e}_3)^{\mathrm{T}},\ \mathbf{0}]^{\mathrm{T}}\in\mathbb{R}^6$为重力项.

由于每个旋翼转子靠接收来源于上层飞行控制单元的PWM信号产生飞行运动, 因此, FAACMR系统的输入转矩$\mathbf{W}_c$应转换成每个旋翼转子对应产生的推力, 并解算出每个旋翼转速, 进而控制系统进行空间位姿飞行. 根据图4, 第i个旋翼电机-螺旋桨组相对机体坐标系$\mathcal{F}_B$的位置和方位表示如下:

$$\mathbf{p}_{Ri}^B=\mathbf{R}_z\left((i-1)\frac{\pi}{3}\right)\mathbf{L}, \tag{4}$$

$$\mathbf{R}_{Ri}^B=\mathbf{R}_z\left((i-1)\frac{\pi}{3}\right)\mathbf{R}_x((-1)^{i+1}\alpha), \tag{5}$$

式中, $\mathbf{R}_z(\cdot)$和$\mathbf{R}_x(\cdot)\in SO(3)$分别为关于$z$和$x$轴的旋转矩阵, $\mathbf{L}\in\mathbb{R}^3$为无人机平台中心轴$z_B$到每个旋翼转子中心的距离, α为定义在2.2节的螺旋桨固定倾角.

旋转的螺旋桨在中心点O_{Ri}中产生推力和力矩. 通过近似假设, 两者都可以用有符号的旋转速度的平方值来建模, 表示如下:

$$\mathbf{f}_i^B=c_f\Omega_i^2\mathbf{R}_{Ri}^B\mathbf{e}_3,\quad i=1,\cdots,6, \tag{6}$$

$$\boldsymbol{\tau}_i^B=(-1)^{i+1}c_\tau\Omega_i^2\mathbf{R}_{Ri}^B\mathbf{e}_3,\quad i=1,\cdots,6, \tag{7}$$

式中, c_f和c_τ分别为将螺旋桨旋转速度Ω_i与产生的推力和力矩联系起来的常数, 式(7)中的$(-1)^{i+1}$项表示所有螺旋桨中反向旋转转子的效应.

根据式(6)和(7), 系统的输入转矩$\mathbf{W}_c$可计算表示如下:

$$\mathbf{W}_c=\sum_{i=1}^{6}\begin{pmatrix}\mathbf{f}_i^B\\ \left[\mathbf{p}_{Ri}^B\right]_\times\mathbf{f}_i^B+\boldsymbol{\tau}_i^B\end{pmatrix}=\mathbf{F}\mathbf{u},\tag{8}$$

式中, $\mathbf{F}\in\mathbb{R}^{6\times6}$包括系统几何和物理特性的分配矩阵, $\mathbf{u}=[\Omega_1^2,\cdots,\Omega_6^2]\in\mathbb{R}^6$包括6个螺旋桨旋转速度平方值.

3.2 阻抗柔顺控制器设计

根据建立的FAACMR系统动力学模型, 考虑未建模的动力学和外部干扰, 为全驱型无人机平台开发一个简单且有效的阻抗控制器, 控制系统总体框架如图5所示. 为解决系统面临的所有不确定性和外界干扰问题, 引入广义动量外部转矩估计器以增强系统的鲁棒性[14,17], 其表示为

$$\widehat{\mathbf{W}}_e=\mathbf{K}_e\left[\mathbf{M}\mathbf{q}_B-\int\left(\mathbf{W}_c-\mathbf{C}\mathbf{q}_B-\mathbf{G}+\widehat{\mathbf{W}}_e\right)\mathrm{d}t\right],\tag{9}$$

式中, $\mathbf{K}_e\in\mathbb{R}^{6\times6}$为转矩估计器的正定对角增益矩阵, 向量$\widehat{\mathbf{W}}_e$为$\mathbf{W}_e$的估计值. 式(9)的微分形式如下:

$$\dot{\widehat{\mathbf{W}}}_e=\mathbf{K}_e\left(\mathbf{W}_e-\widehat{\mathbf{W}}_e\right),\tag{10}$$

式(9)意味着估计值$\widehat{\mathbf{W}}_e$能通过一阶低通滤波跟踪外部转矩$\mathbf{W}_e$. 接着, 根据转矩估计器, 利用阻抗控制思想计算FAACMR系统的输入转矩$\mathbf{W}_c$. 阻抗动力学表示如下:

$$\mathbf{M}_d\dot{\mathbf{e}}_v+\mathbf{D}_d\mathbf{e}_v+\mathbf{K}_d\mathbf{e}_p=\widehat{\mathbf{W}}_E,\tag{11}$$

式中, $\mathbf{M}_d$, $\mathbf{D}_d$和$\mathbf{K}_d\in\mathbb{R}^{3\times3}$分别为正定对角的惯性、阻尼和刚度系数矩阵. 向量$\mathbf{e}_p=[\mathbf{e}_{p,\mathrm{lin}}^{\mathrm{T}},\ \mathbf{e}_{p,\mathrm{rot}}^{\mathrm{T}}]^{\mathrm{T}}$和$\mathbf{e}_v=[\mathbf{e}_{v,\mathrm{lin}}^{\mathrm{T}},\ \mathbf{e}_{v,\mathrm{rot}}^{\mathrm{T}}]^{\mathrm{T}}\in\mathbb{R}^6$分别为机体坐标系$\mathcal{F}_B$下无人机的位姿误差和线/角速度误差, 具体表示如下:

$$\begin{bmatrix}\mathbf{e}_{p,\mathrm{lin}}\\ \mathbf{e}_{p,\mathrm{rot}}\\ \mathbf{e}_{v,\mathrm{lin}}\\ \mathbf{e}_{v,\mathrm{rot}}\end{bmatrix}=\begin{bmatrix}\mathbf{R}_B^{\mathrm{T}}(\mathbf{p}_I-\mathbf{p}_{I,r})\\ \frac{1}{2}\left(\mathbf{R}_{B,r}^{\mathrm{T}}\mathbf{R}_B-\mathbf{R}_B^{\mathrm{T}}\mathbf{R}_{B,r}\right)^{\vee}\\ \mathbf{R}_B^{\mathrm{T}}(\mathbf{v}_I-\mathbf{v}_{I,r})\\ \boldsymbol{\omega}_B-\mathbf{R}_B^{\mathrm{T}}\mathbf{R}_{B,r}\boldsymbol{\omega}_{B,r}\end{bmatrix},\tag{12}$$

式中, $\mathbf{p}_{I,r}\in\mathbb{R}^3$和$\mathbf{R}_{B,r}\in SO(3)$分别为无人机的参考位置和姿态, $\mathbf{v}_{I,r}\in\mathbb{R}^3$为惯性坐标系$\mathcal{F}_I$下参考的无人机线速度, $\boldsymbol{\omega}_{B,r}\in\mathbb{R}^3$为机体坐标系$\mathcal{F}_B$下参考的无人机角速度, 符号$(\cdot)^{\vee}$: $SO(3)\to\mathbb{R}^3$表示算子$[\cdot]_\times$的逆运算.

利用式(9)中转矩估计器, 并结合式(1)中FAACMR系统动力学和式(11)中阻抗动力学, 可计算出如下系统的输入转矩$\mathbf{W}_c$:

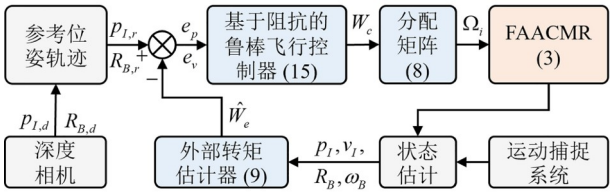


图 5 (网络版彩图)FAACMR控制系统总体框架

Figure 5 (Color online) Overall framework of the FAACMR control system.

$$\begin{aligned}\mathbf{W}_c=&(\mathbf{M}\mathbf{M}_d^{-1}-\mathbf{I}_6)\widehat{\mathbf{W}}_e-\mathbf{M}\mathbf{M}_d^{-1}\mathbf{K}_d\mathbf{e}_p\\&-\mathbf{M}\mathbf{M}_d^{-1}\mathbf{D}_d\mathbf{e}_v+\mathbf{M}\dot{\mathbf{q}}_{B,r}+\mathbf{C}\mathbf{q}_B+\mathbf{G},\end{aligned}\tag{13}$$

式中, $\dot{\mathbf{q}}_{B,r}\in\mathbb{R}^6$为无人机参考的加速度项一个虚拟控制输入. 定义如下变量:

$$\begin{cases}\overline{\mathbf{M}}_d=\mathbf{M}\mathbf{M}_d^{-1}-\mathbf{I}_6,\\ \overline{\mathbf{D}}_d=\mathbf{M}\mathbf{M}_d^{-1}\mathbf{D}_d,\\ \overline{\mathbf{K}}_d=\mathbf{M}\mathbf{M}_d^{-1}\mathbf{K}_d.\end{cases}\tag{14}$$

最后, FAACMR系统的阻抗控制输入转矩$\mathbf{W}_c$设计为

$$\mathbf{W}_c=\overline{\mathbf{M}}_d\widehat{\mathbf{W}}_e-\overline{\mathbf{K}}_d\mathbf{e}_p-\overline{\mathbf{D}}_d\mathbf{e}_v+\mathbf{M}\dot{\mathbf{q}}_{B,r}+\mathbf{C}\mathbf{q}_B+\mathbf{G}.\tag{15}$$

3.3 实际运用概述

系统末端执行器的位置与相互作用力之间具备一个良好的柔顺行为是实现FAACMR系统与环境稳定可靠的物理交互的关键. 所设计的FAACMR系统有两个顺应性来源: (1) 基于阻抗的鲁棒飞行控制器; (2) 机械柔顺性, 即在末端检测装置与旋转作业机械臂连接处采用弹簧联轴器结构, 并利用弹性带辅助归位, 能有效吸收大部分的相互作用力, 避免对系统施加过大的压力.

此外, FAACMR系统对基础设施表面进行接触式检测时, 为使显微探头、超声和电位等末端传感器测量准确, 接触点力作用需尽可能地与被测表面垂直. 因此, 考虑接触过程中检测传感器对于任务目标点测量, 以复杂非结构化曲面为例, 使用Intel RealSense D435i深度相机离线获取目标点, 如图6所示. 具体地, 相机生成深度图像, 然后将其转换为点云信息; 对点云信息进行滤波和稀疏处理, 滤除噪声; 然后, 利用最小

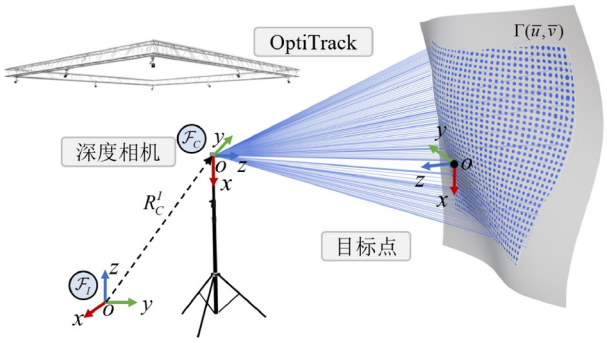


图 6　(网络版彩图)离线测量任务目标点

Figure 6　(Color online) Offline measurement of task target points.

二乘法对处理后的点云信息进行拟合，得到非均匀有理B样条(nonuniform rational B-splines, NURBS)曲面，该曲面可表示为[23]

$$\mathbf{p}_e^c=\boldsymbol{\Gamma}(\bar{u},\bar{v})=\frac{\sum_{i=0}^{m}\sum_{j=0}^{n}N_i^{\bar{p}}(\bar{u})M_j^{\bar{q}}(\bar{v})\bar{w}_{ij}\mathbf{P}_{ij}}{\sum_{i=0}^{m}\sum_{j=0}^{n}N_i^{\bar{p}}(\bar{u})M_j^{\bar{q}}(\bar{v})\bar{w}_{ij}},\tag{16}$$

式中，$\mathbf{p}_e^c\in\mathbb{R}^3$为相机坐标系$\mathcal{F}_C$下的目标点位置. $\boldsymbol{\Gamma}(\bar{u},\bar{v})$表示从参数空间$\mathcal{D}=\{(\bar{u},\bar{v})\mid\bar{u},\bar{v}\in[0,1]\}\in\mathbb{R}^2$到构型空间$\mathcal{C}$的映射，其中每个$(\bar{u},\bar{v})$对应曲面上的三维空间点$\mathbf{p}_e^c$. $\mathbf{P}_{ij}$为曲面的控制点，用于定义曲面的形状. $N_i^{\bar{p}}(\bar{u})$和$M_j^{\bar{q}}(\bar{v})$分别为参数$\bar{u}$和$\bar{v}$方向上的B样条基函数，其中$\bar{p}$和$\bar{q}$为阶数. 参数$\bar{w}_{ij}$表示每个控制点影响曲面形状的权重.

接着，根据式(16)，相机坐标系$\mathcal{F}_C$下的NURBS曲面的法向量$\bar{\mathbf{n}}^c\in\mathbb{R}^3$表示如下:

$$\bar{\mathbf{n}}^c=\left.\frac{\partial\boldsymbol{\Gamma}(\bar{u},\bar{v})}{\partial\bar{u}}\right|_{(\bar{u}_0,\bar{v}_0)}\times\left.\frac{\partial\boldsymbol{\Gamma}(\bar{u},\bar{v})}{\partial\bar{v}}\right|_{(\bar{u}_0,\bar{v}_0)}.\tag{17}$$

通过齐次变换，曲面上目标点的方位可从相机坐标系$\mathcal{F}_C$转换至惯性坐标系$\mathcal{F}_I$, 表示如下:

$$\mathbf{p}_e^I=\mathbf{p}_c^I+\mathbf{R}_C^I\boldsymbol{\Gamma}(\bar{u},\bar{v}),\tag{18}$$

$$\bar{\mathbf{n}}^I=\mathbf{R}_C^I\bar{\mathbf{n}}^c,\tag{19}$$

式中，$\mathbf{p}_e^I$和$\mathbf{p}_c^I\in\mathbb{R}^3$分别为惯性坐标系$\mathcal{F}_I$下目标点和相机的位置，$\mathbf{R}_C^I\in\mathbb{R}^{3\times3}$为从相机坐标系$\mathcal{F}_C$到惯性坐标系$\mathcal{F}_I$的旋转矩阵，$\bar{\mathbf{n}}^I\in\mathbb{R}^3$为惯性坐标系$\mathcal{F}_I$中下目标点的法向量. 式(18)和(19)得到的离线向量$\mathbf{p}_e^I$和$\bar{\mathbf{n}}^I$用于构建FAACMR系统所需的参考轨迹.

4　面向作业任务模拟的高保真仿真平台构建与性能测试

4.1　高保真Gazebo仿真平台与典型作业场景构建

为测试和验证所设计的系统及其相关算法，在Gazebo中搭建集场景任务(面向风力发电叶片、油气管道和桥梁等探测维护任务)模拟与机器人动力学于一体的高保真仿真平台，如图7所示，可实现算法全流程测试验证与直接迁移, 仿真环境为Ubuntu 20.04下的ROS Noetic操作系统. Gazebo支持多种传感器的集成，如模拟无人机的飞行控制单元、惯性测量单元(inertial measurement unit, IMU)、深度相机、全球定位系统(global positioning system, GPS)、力传感器等多种传感器以及模拟自然光、风速等现实环境参数. 此外，还集成了如open dynamics engine (ODE), Bullet和Simbody等多种物理引擎，可充分模拟机器人在真实环境中的物理行为, 如重力、摩擦力和碰撞等. 同时, Gazebo支持ROS操作系统对机器人进行控制和数据交换，通过基于ROS的话题信息机制可对传感器的反馈数据进行接收和处理, 方便进行仿真测试.

具体地，利用sw2urdf插件将在SolidWorks建立的FAACMR三维模型导出并转化成Gazebo支持的urdf格式; 然后, 对urdf文件格式进行修改, 在urdf文件中调整FAACMR的属性，如质量、摩擦系数和惯性矩阵等; 接着, 对FAACMR的urdf文件进行转换, 转换成Gazebo支持的原生sdf格式，并添加包括飞控单元、IMU、磁力计和气压计等传感器插件，以支持机器人实现飞行控制; 最后, 可对机器人添加表面纹理.

4.2　仿真性能测试与典型场景接触作业模拟

在搭建的高保真仿真平台中进行自由飞行和接触检测测试, 以初步验证所设计的系统及算法. 相比于桥梁和油气管道，风力发电叶片接触检测表面为非结构化曲面. 因此，以风力发电叶片接触检测为例，测试所提系统及相关算法. 模型参数设置为$\mathbf{M}$=diag(8.745, 8.745, 8.745, 0.1560, 0.1568, 0.2908), 控制器参数设置为$\overline{\mathbf{K}}_d$=diag(12, 12, 15, 0.3, 0.3, 0.3)和$\overline{\mathbf{D}}_d$=diag(6, 6, 8, 0.18, 0.18, 0.18)，外部转矩估计器增益设置为$\mathbf{K}_e$=

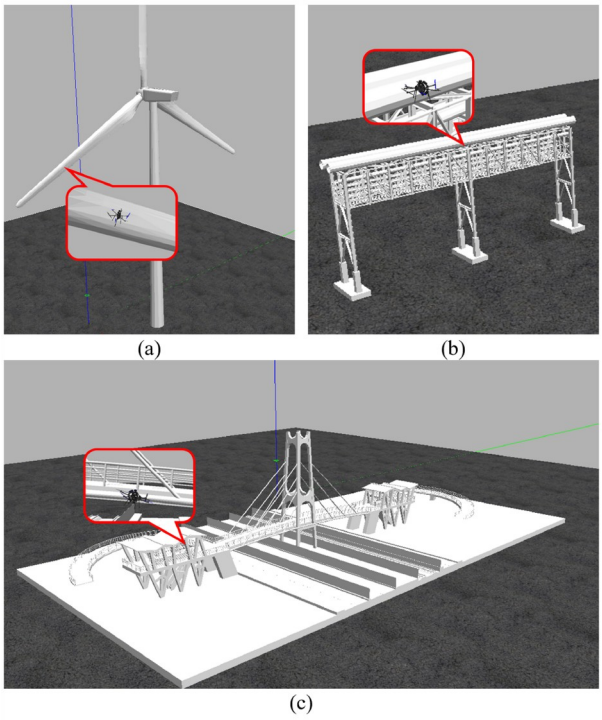


图 7 (网络版彩图)集场景任务模拟与机器人动力学于一体的高保真仿真平台. (a) 风力发电叶片; (b) 油气管道; (c) 桥梁

Figure 7 (Color online) High-fidelity simulation platform that integrates scenario task simulation and robot dynamics. (a) Wind turbine blade; (b) oil and gas pipeline; (c) bridge.

diag(1, 1, 1, 0.2, 0.2, 0.2).

在进行接触检测测试之前，首先验证FAACMR系统在非接触模态下抵抗旋转作业机械臂运动耦合的稳定自由飞行能力. 在测试过程中，旋转作业机械臂以$(\pi/4)\cos(\pi t/4)$ rad s^{-1}速度运动. 参考位置轨迹设置为$\mathbf{p}_r=[\sin(\pi t/8),\ \sin(\pi t/4),\ 0.3\sin(\pi t/8)+3]^{\mathrm{T}}$, 参考姿态始终设置为零. 非接触模态下自由飞行抗扰测试结果如图8所示. 图8(a)和(b)分别是Gazebo仿真平台中系统三维位置飞行轨迹和x-y-z位置跟踪效果图. 从图中可看出，在旋转作业机械臂运动过程中，系统仍能较好跟踪上参考位置轨迹. 图8(c)和(d)分别是FAACMR系统轨迹跟踪过程中位置误差和姿态误差结果图. 非接触模态下自由飞行抗扰测试的绝对误差均值和方差结果见表1. 由于作业机械臂在机体坐标系$\mathcal{F}_B$下绕y_B轴旋转运动，导致俯仰角跟踪误差略大于翻滚角和偏航角跟踪误差，但最大误差在0.02 rad(1.146°)以内. 最大位置跟踪为0.047 m.

接着，在搭建的高保真仿真平台中进行连续滑动

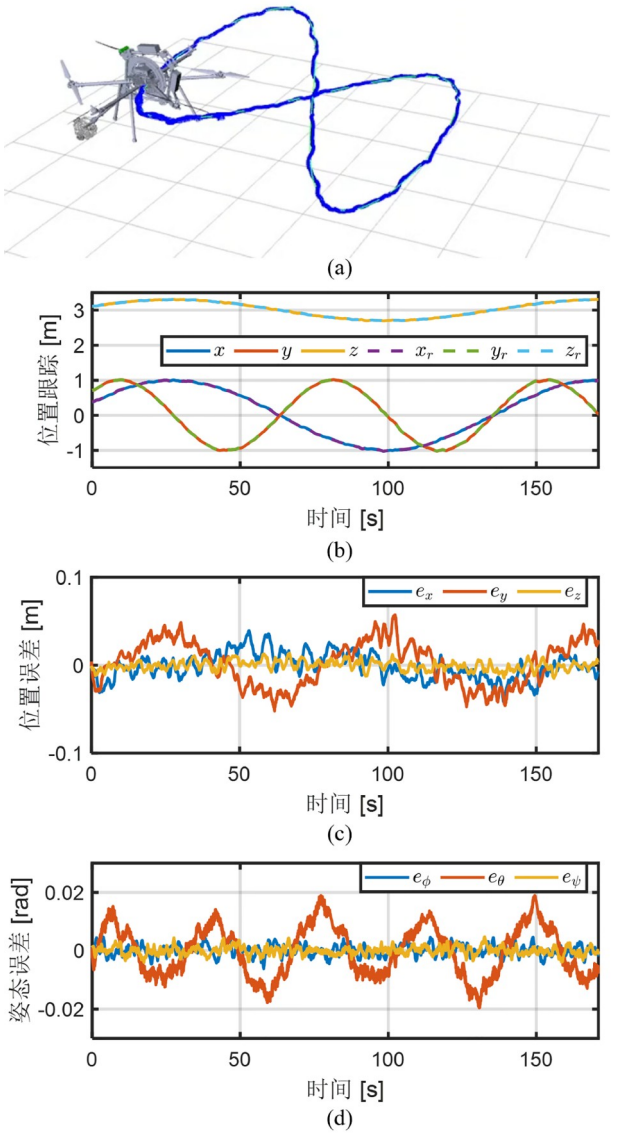


图 8 (网络版彩图)仿真平台中非接触模态下自由飞行抗扰测试结果. (a) 三维位置飞行轨迹; (b) x-y-z方向位置跟踪; (c) 位置误差; (d) 姿态误差

Figure 8 (Color online) Free flight anti-disturbance test results under non-contact mode in the simulation platform. (a) Three-dimensional position flight trajectory; (b) x-y-z position tracking; (c) position error; (d) attitude error.

接触非结构化曲面的风力发电叶片测试，测试结果如图9所示. 图9(a)展示FAACMR系统在仿真平台中连续滑动垂直接触叶片表面的效果图，其中蓝色可视化曲线表示接触过程中全驱型无人机机体的运动轨迹，红色曲线表示接触过程中末端滑动机构运动轨迹. 图9(b)，(c)和(d)分别为接触过程中无人机x-y-z方向的

表 1　非接触模态下自由飞行抗扰测试结果的绝对误差均值和方差

Table 1　Absolute error mean and variance of free flight anti-disturbance test results under non-contact mode

误差	绝对位置误差 (m)			绝对姿态误差 (rad)		
	$\lvert e_x\rvert$	$\lvert e_y\rvert$	$\lvert e_z\rvert$	$\lvert e_\varphi\rvert$	$\lvert e_\theta\rvert$	$\lvert e_\psi\rvert$
均值	0.0119	0.0220	0.0043	0.0015	0.0076	0.0011
方差	7.0137e−5	1.4421e−4	9.7568e−6	1.2840e−6	1.6332e−5	7.3561e−7

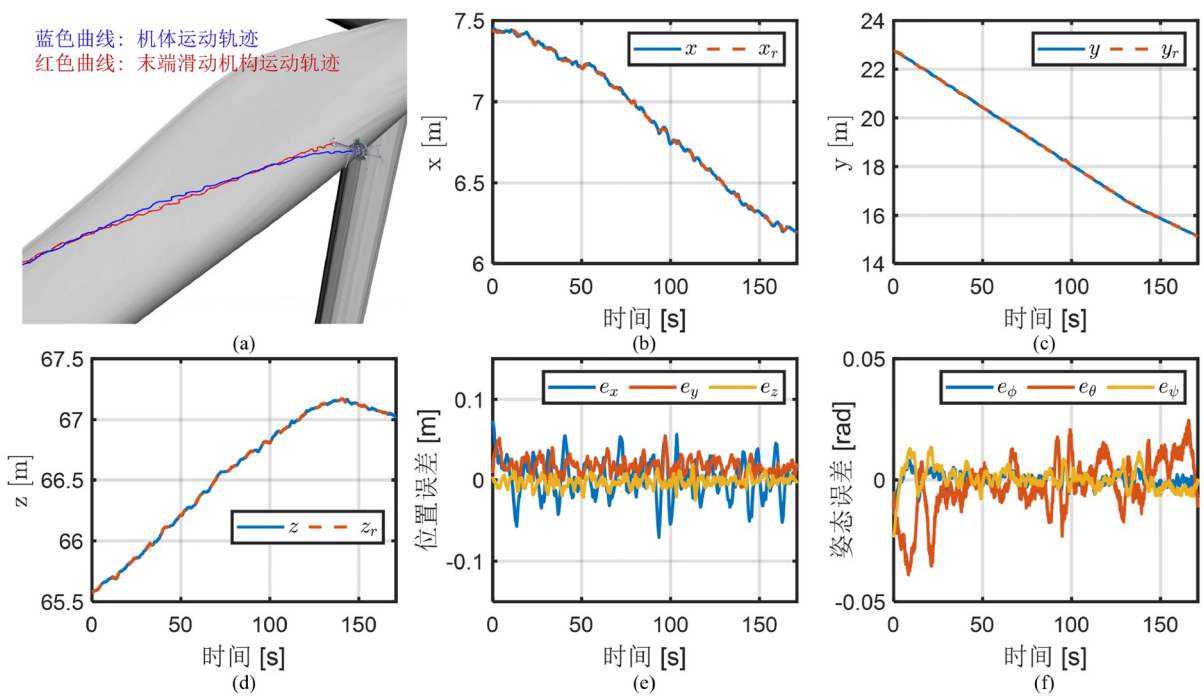


图 9　(网络版彩图)仿真平台中连续滑动接触非结构化曲面的风力发电叶片测试结果. (a) 机体和末端滑动机构运动轨迹; (b) x方向位置跟踪; (c) y方向位置跟踪; (d) z方向位置跟踪; (e) 位置误差; (f) 姿态误差

Figure 9　(Color online) Test results of continuous sliding contact on unstructured surfaces with a wind turbine blade in the simulation platform. (a) Motion trajectories of the body and end slide mechanism; (b) x-direction position tracking; (c) y-direction position tracking; (d) z-direction position tracking; (e) position error; (f) attitude error.

轨迹跟踪图, 图9(e)为接触过程中无人机位置跟踪误差图, 可以看出x方向跟踪误差略大于y-z方向跟踪误差, 最大跟踪误差在0.070 m以内. 图9(f)为接触过程中无人机位置姿态跟踪误差图. 两个仿真测试验证了所提出的FAACMR系统及相关算法的有效性.

5　实验测试与验证

5.1　实验设置

为进一步验证所设计的FAACMR系统及相关算法的有效性, 进行与仿真场景类似的实际非接触模态下自由飞行抗扰与持续滑动接触检测实际风力发电叶片实验测试. 实际FAACMR系统总质量为8.745 kg, 惯性参数与仿真中设置相同为$\mathbf{J}$=diag(0.1560, 0.1568, 0.2908) kg m^2. 多次实验调优控制器参数为$\overline{\mathbf{K}}_d$=diag(20, 20, 21.5, 0.3, 0.3, 0.3), $\overline{\mathbf{D}}_d$=diag(12, 12, 13, 0.2, 0.2, 0.2)和$\mathbf{K}_e$=diag(1.2, 1.2, 1.2, 0.25, 0.25, 0.25). 所有软件在Ubuntu 20.04系统中的ROS Noetic操作系统进行开发, 飞行控制器以200 Hz运行.

5.2　自由飞行抗扰测试

在自由飞行抗扰测试中, 参考位置轨迹设置为定

点($\mathbf{p}_r$=[−0.268, 0.935, 1.5]$^{\mathrm{T}}$ m). 首先, FAACMR系统被命令跟踪参考空间顶点, 其中旋转作业机械臂处于水平位置. 然后, Dynamixel伺服舵机驱动作业机械臂旋转, 实验测试结果如图10所示. 图10(a)为实验视频中作业机械臂旋转过程中系统定点运动图, 图10(b)和(c)分别为FAACMR系统在作业机械臂旋转过程中的位置误差图和姿态误差图. 可以看出, 最大位置跟踪误差发生在大约131.4 s处的y方向, 最大位置跟踪误差0.045 m, 与此同时翻滚角最大误差为0.053 rad. 位姿误差主要来源于旋转作业机械臂对飞行平台产生的扰动, 本文考虑作业机械臂处于准静态运动状态, 并将作业机械臂的动力学视为对飞行平台的小扰动, 由3.2节设计的控制器进行补偿. 后续将考虑作业机械臂动力学运动, 利用线动量和角动量[24,25]建立作业机械臂对飞行平台产生的扰动力和力矩, 并将其补偿到飞行控制器, 以提升系统鲁棒性和控制精度.

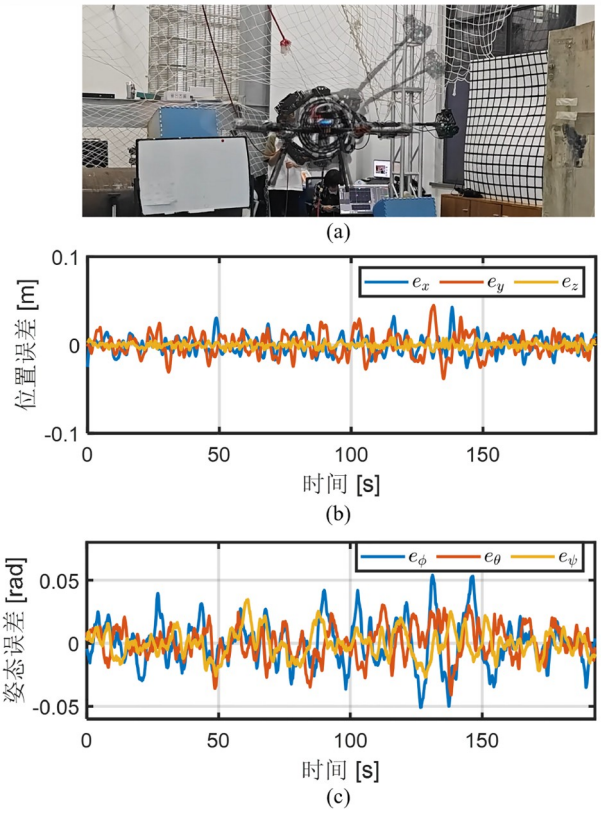


图 10 (网络版彩图)非接触模态下自由飞行抗扰实验测试结果. (a) 实验视频中作业机械臂旋转过程中系统定点运动图; (b) 位置误差; (c) 姿态误差

Figure 10 (Color online) Free flight anti-disturbance test results under non-contact mode. (a) System fixed-point motion diagram during the rotation of the manipulator in the experimental video; (b) position error; (c) attitude error.

5.3 面向风力发电叶片非结构化曲面的接触滑动检测应用验证

最后, 在真实的一截尺寸约为2.2 m×2.0 m的风力发电叶片上进行连续滑动接触测试. 使用3.3节所述的点云曲面提取算法, 获得风力发电叶片曲面空间位置及法向量信息, 如图11所示. 图11可视化接触点及其法线, 并控制FAACMR系统与风力发电叶片曲面垂直交互, 其中选择参考的接触点使其穿透曲面一定距离, 以确保末端滑动机构与表面接触.

空中与非结构化风力发电叶片曲面物理交互的实验结果如图12所示. 图12(a)为FAACMR系统的末端滑动机构与风力发电叶片接触图, 其中右上角为显微探头探测到的实时画面. 图12(b)为FAACMR系统在连续滑动过程中的x-y-z方向轨迹跟踪图, 图12(c)为连续滑动过程中FAACMR系统的位置误差图. 可以看出, 最大位置跟踪误差发生在大约62 s处的y方向, 最大位置跟踪误差0.062 m. 图12(d)为在风力发电叶片接触检测实验过程中偏航角跟踪图, 其中FAACMR系统偏航跟踪能力作为垂直接触检测叶片表面的一项重要指标. 图12(e)为连续滑动过程中FAACMR系统的姿态误差图. 实际实验测试进一步验证了所设计的FAACMR系统及相关算法的有效性.

6 结论与讨论

本文面向国家重大工程基础设施对空中机器人技术与装备的重大需求, 开展具备空中接触式作业能力的全驱型机器人技术与系统研究. 重点攻克全驱型空

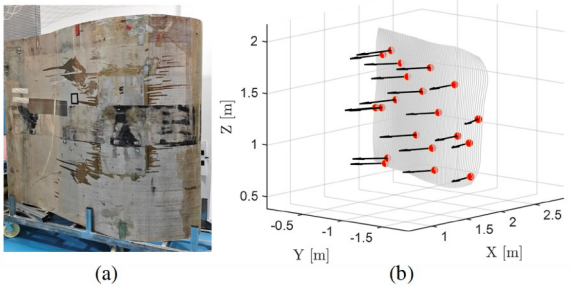


图 11 (网络版彩图)用于实验的一段风力发电叶片 (a) 和表面上绘制的20个随机点 (b)

Figure 11 (Color online) A cutaway of a wind turbine blade used in the experiment (a) and 20 random points drawn on its surface (b).

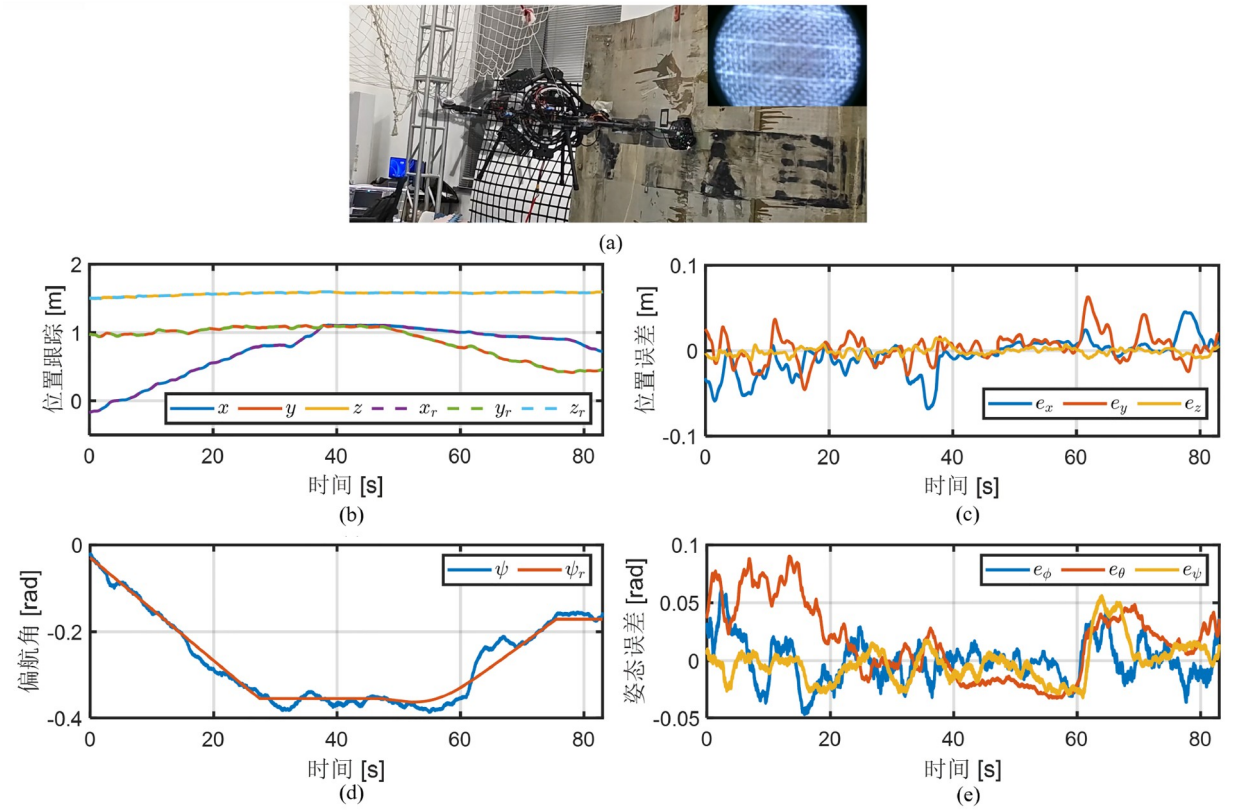


图 12　(网络版彩图)连续滑动检测风力发电叶片实验测试结果. (a) 末端机构与风力发电叶片接触图; (b) *x*-*y*-*z*方向位置跟踪; (c) 位置误差; (d) 偏航角跟踪; (e) 姿态误差

Figure 12　(Color online) Experimental test results of continuous sliding detection of a wind turbine blade. (a) Contact diagram between the end mechanism and the wind turbine blade; (b) *x*-*y*-*z* position tracking; (c) position error; (d) yaw angle tracking; (e) attitude error.

中接触式作业机器人结构一体化设计、空中接触作业模态下柔顺控制以及面向重大工程与基础设施维护的全驱型空中接触式作业机器人集成验证等关键技术, 建立空中机器人与环境耦合作业模态下的动力学建模理论, 研制出机器人系统样机, 在风力发电叶片典型工程基础设施上进行空中接触式结构检测探伤, 并验证了效果与性能, 填补了我国在空中智能化运维机器人技术与系统方法的空白. 研制的全驱型空中接触式作业机器人系统在仿真与实验场景中进行了验证, 下一步工作将朝整机质量轻量化、结构紧凑化和系统高集成化等方向优化研制的全驱型空中接触式作业机器人系统, 并将利用GPS、深度相机和激光雷达等传感器实现机器人定位, 用于实现室外实际桥梁、风力发电叶片和油气管道三类基础设施检测探伤作业.

参考文献

1　Zhong H, Liang J, Chen Y, et al. Prototype, modeling, and control of aerial robots with physical interaction: A review. IEEE Trans Automat Sci Eng, 2025, 22: 3528–3542

2　Ollero A, Cortes J, Santamaria-Navarro A, et al. The aeroarms project: Aerial robots with advanced manipulation capabilities for inspection and maintenance. IEEE Robot Automat Mag, 2018, 25: 12–23

3　Caprari G, Breitenmoser A, Fischer W, et al. Highly compact robots for inspection of power plants. J Field Robotics, 2012, 29: 47–68

4　Erdos D, Erdos A, Watkins S E. An experimental UAV system for search and rescue challenge. IEEE Aerosp Electron Syst Mag, 2013, 28: 32–37

5　Liang J, Wang Y, Zhong H, et al. Robust adaptive tracking control for aerial transporting a cable-suspended payload using backstepping sliding

mode techniques. IEEE Trans Automat Sci Eng, 2025, 22: 4490–4500
6 Gong J W, Fan Y M. Active disturbance rejection control method for UAV autonomous aerial refueling based on reflected pigeon-inspired optimization. Sci Sin Tech, 2025, 55: 893–905
7 Aucone E, Kirchgeorg S, Valentini A, et al. Drone-assisted collection of environmental DNA from tree branches for biodiversity monitoring. Sci Robot, 2023, 8: eadd5762
8 Zhong H, Wang Y N, Li L, et al. Rotor-flying manipulator modeling and control with dynamic compensation for gravity offset (in Chinese). Control Theory Appl, 2016, 33: 311–320 [钟杭, 王耀南, 李玲, 等. 旋翼飞行机械臂建模及动态重心补偿控制. 控制理论与应用, 2016, 33: 311–320]
9 Zhang G Y, He Y Q, Dai B, et al. Towards grasping task: System and control of an aerial manipulator (in Chinese). Robot. 2019, 41: 19–29 [张广玉, 何玉庆, 代波, 等. 面向抓取作业的飞行机械臂系统及其控制. 机器人, 2019, 41: 19–29]
10 Liang J, Zhong H, Wang Y, et al. Reference optimization-based compliant control for aerial pipeline inspection using a hexacopter with a robotic contact device. IEEE ASME Trans Mechatron, 2024, 29: 4063–4074
11 Liang J, Chen Y, Wu Y, et al. Active physical interaction control for aerial manipulator based on external wrench estimation. IEEE ASME Trans Mechatron, 2023, 28: 2774–2785
12 Ryll M, Muscio G, Pierri F, et al. 6D interaction control with aerial robots: The flying end-effector paradigm. Int J Robotics Res, 2019, 38: 1045–1062
13 Rashad R, Bicego D, Zult J, et al. Energy aware impedance control of a flying end-effector in the port-Hamiltonian framework. IEEE Trans Robot, 2022, 38: 3936–3955
14 Bodie K, Brunner M, Pantic M, et al. Active interaction force control for contact-based inspection with a fully actuated aerial vehicle. IEEE Trans Robot, 2020, 37: 709–722
15 Allenspach M, Bodie K, Brunner M, et al. Design and optimal control of a tiltrotor micro-aerial vehicle for efficient omnidirectional flight. Int J Robotics Res, 2020, 39: 1305–1325
16 Liang J, Zhong H, Wang Y, et al. Adaptive force tracking impedance control for aerial interaction in uncertain contact environment using barrier function. IEEE Trans Automat Sci Eng, 2024, 21: 4720–4731
17 Liang J, Wang Y, Zhong H, et al. Robust variable impedance control for aerial compliant interaction with stability guarantee. IEEE Trans Ind Inf, 2023, 20: 3351–3360
18 Tognon M, Chavez H A T, Gasparin E, et al. A truly-redundant aerial manipulator system with application to push-and-slide inspection in industrial plants. IEEE Robot Autom Lett, 2019, 4: 1846–1851
19 Cuniato E, Lawrance N, Tognon M, et al. Power-based safety layer for aerial vehicles in physical interaction using Lyapunov exponents. IEEE Robot Autom Lett, 2022, 7: 6774–6781
20 Malczyk G, Brunner M, Cuniato E, et al. Multi-directional interaction force control with an aerial manipulator under external disturbances. Auton Robot, 2023, 47: 1325–1343
21 Markovic L, Car M, Orsag M, et al. Adaptive stiffness estimation impedance control for achieving sustained contact in aerial manipulation. In: Proceedings of the IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA). Piscataway: IEEE, 2021. 117–123
22 Xu M, Hu A, Wang H. Image-based visual impedance force control for contact aerial manipulation. IEEE Trans Automat Sci Eng, 2023, 20: 518–527
23 Abbena E, Salamon S, Gray A. Modern Differential Geometry of Curves and Surfaces with Mathematica. 3rd ed. New York: Chapman and Hall/CRC, 2017
24 Zhang G, He Y, Dai B, et al. Robust control of an aerial manipulator based on a variable inertia parameters model. IEEE Trans Ind Electron, 2020, 67: 9515–9525
25 Wang M, Chen Z, Guo K, et al. Millimeter-level pick and peg-in-hole task achieved by aerial manipulator. IEEE Trans Robot, 2024, 40: 1242–1260

Design and implementation of a fully-actuated aerial contact manipulation robot system

LIANG JiaCheng[1,2], WANG YaoNan[1,2], ZHONG Hang[1,2], ZHANG ZhiXing[1] & ZHANG Hui[1,2]

[1] *School of Artificial Intelligence and Robotics, Hunan University, Changsha 410082, China*
[2] *National Engineering Research Center for Robot Visual Perception and Control Technology, Changsha 410082, China*

Aiming at the significant demand for aerial robot technology and equipment for major national engineering infrastructure, such as large bridges, wind turbine blades, and oil and gas pipelines, research on robot technology and systems with aerial contact manipulation capabilities was carried out. First, a fully actuated aerial contact manipulation robot system was designed and developed. The fully actuated characteristics enable independent control of the six-dimensional posture of the aerial flight platform. The active wheel walking device was integrated at the end of the robot to meet the needs of continuous sliding detection. Second, a dynamic model of the aerial robot and the environment coupling operation mode was established, and a generalized momentum-based external wrench estimator was introduced to observe the external disturbances. Then, a simple and effective impedance compliant control framework was proposed to solve the problem of continuous and stable interaction detection operations. To test and verify the designed system and the related algorithms, a high-fidelity simulation platform was built, and a series of anti-disturbance and interaction simulation tests were carried out. Finally, an actual wind turbine blade continuous sliding detection experiment was carried out to verify the reliability of the designed fully actuated aerial contact manipulation robot system.

fully actuated aerial contact manipulation robot, design and implementation, modeling and control, high-fidelity simulation platform, experimental test and verification

doi: 10.1360/SST-2025-0077